



УДК 551.4.01

МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РЕЛЬЕФА БЕЛГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ РАЗНОЙ СТЕПЕНИ ГЕНЕРАЛИЗАЦИИ

MORPHOMETRIC ANALYSIS OF DIGITAL ELEVATION MODELS OF THE BELGOROD REGION AT DIFFERENT DEGREES OF GENERALIZATION

А.Г. Нарожняя, Ж.А. Буряк
A.G. Narozhnyaya, Zh.A. Buryak

Белгородский государственный национальный исследовательский университет, Россия, 308015, г. Белгород, ул. Победы, 85

Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St, Belgorod, 308015, Russia

E-mail: narozhnyaya_a@bsu.edu.ru, buryak@bsu.edu.ru

Аннотация. Использование разномасштабных исходных картографических материалов при геоморфологическом анализе может привести к противоречивым результатам. При создании цифровой модели рельефа (ЦМР) средствами геоинформационных систем масштаб исходной картографической основы выражен в размере ячейки, который должен быть статистически обоснован. В работе представлена методика определения допустимого и оптимального разрешения ЦМР с учетом геоморфологических особенностей местности для масштабов топографических карт 1:25000 и 1:200000. Оптимальный размер ячейки ЦМР предложено подбирать исходя из минимальных значений средней абсолютной и среднеквадратической ошибки определения высот с учетом нормативной погрешности съемки рельефа. Установлено, что для условий Белгородской области при построении ЦМР по топографическим картам М 1:25000 оптимальный размер ячейки составляет 30 м, а по М 1:200000 – 200 м. Для территории области были построены ЦМР соответствующих масштабов, и установлено, что разница в значениях морфометрических показателей для них может достигать 13%. На территории области преобладают склоновые ландшафты (67–77% площади) северной и южной экспозиций с вертикальным расчленением 40–80 м.

Résumé. Using a multiscale map in the geomorphological analysis can lead to contradictory results. When you create a digital elevation model (DEM) by tools of geographic information systems the scale of the original cartographic basis is expressed in the size of cells that should be statistically justified. The article presents method of determining an acceptable and optimal resolution DEM with regard to geomorphological features of the area for two topographic maps scale 1:25000 and 1:200000. The optimum cell size DEM asked to choose based on minimum values the of the average absolute and root-mean-square error determination heights given the regulatory uncertainty shooting terrain. For the Belgorod region, we have set conditions that the optimal cell size is 30 m (1:25000), 200 m (1:200000) for creating DEM. It found that the difference in the values of parameters for morphometric data scales can reach 13%. The region dominated landscapes of the slope (67–77%), northern and southern expositions with a vertical dismemberment of 40–80 m.

Ключевые слова: ЦМР, рельеф, Белгородская область, ГИС, пространственное разрешение, масштаб, морфометрический анализ.

Key words: DEM, Belgorod region, GIS, spatial resolution, scale, morphometric analysis.

Введение

Сложные рельефные условия Белгородской области, расположенной на юго-западе Среднерусской возвышенности, обусловили развитие региональных геоморфологических исследований. К настоящему времени накоплен значительный материал, связанный с различными аспектами исследования рельефа Белгородской области: проведена ландшафтная дифференциация [Юдина, 2005], охарактеризованы качественные характеристики преобладающих эрозионных процессов [Петина и др., 2009], проведен анализ площади эродированных земель [Лисецкий, Марциневская, 2009], оценена площадь оползневых, карстовых, суффозных и эоловых форм [Грайворонская, 2012; Белоусова и др., 2013; Хрисанов и др., 2016]. За последнее десятилетие к классическим картометрическим методам исследований добавились



средства ГИС-технологий, основанные на автоматизированном анализе цифровых моделей рельефа (ЦМР). С использованием геоинформационных методов была оценена длина эрозионной сети и дана ее количественная характеристика [Нечетова, Нарожная, 2010; Нарожная, 2011], вычислена средняя длина склонов [Половинко, 2010], дана количественная оценка потенциального смыва по бассейнам рек [Спесивый, Лисецкий, 2014], выполнен анализ бассейновой структуры Белгородской области [Нарожная, 2011; Кузьменко и др., 2012] и проведена их эколого-геоморфологическая типизация [Yermolaev et al., 2015].

В большинстве работ используют разномасштабные данные, что приводит к противоречиям в оценке некоторых геоморфологических характеристик. На сегодняшний день отсутствует качественный анализ морфометрических параметров рельефа Белгородской области. При цифровом моделировании функция масштаба как фактора генерализации данных переходит на размер ячейки ЦМР – шаг сетки дискретных данных высот. Поэтому особо важным условием при геоинформационном моделировании рельефа является подбор размера ячейки, соответствующего масштабу исходной картографической основы.

Известно, что размер пикселя растровой модели данных определяет точность географического моделирования [Hutchinson, 1996]: с увеличением размера ячейки грида в районах с более расчлененным рельефом погрешность ЦМР увеличивается. В исследовании J.P. Walker, G.R. Willgoose [1999], отмечено сильное варьирование морфометрических показателей рельефа при изменении шага сетки ЦМР, в отличие от параметров дренажной сети, которые ведут себя более устойчиво. Размер ячейки должен опираться на особенности пространственного распределения исследуемого признака на заданной территории. В большинстве работ по исследованию рельефа размер ячейки сетки выбирается без какого-либо обоснования, «интуитивно» [Глотко, 2005; Ерицян, 2013; Панов, 2013; Тарасова, 2014; и др.].

Поэтому актуальной задачей является создание корректных ЦМР Белгородской области разной пространственной иерархии, обоснование оптимального размера ячеек моделей, соответствующих масштабу исходных топографических карт, а также проведение сравнительного морфометрического анализа полученных ЦМР.

Объекты и методы исследования

Белгородская область расположена на юго-западных отрогах Среднерусской возвышенности и представляет собой возвышенную равнину, приподнятую в северной части и имеющую слабовыраженные уклоны на запад–юго-запад и восток–юго-восток. Самая высокая точка Белгородской области находится в Прохоровском районе, в верховье р. Осколец вблизи с. Истобное – 277.2 м над уровнем моря. Самая низкая точка отмечена в Ровеньском районе, в днище долины р. Айдар – на абсолютной высоте 68.3 м [Лисецкий и др., 2015].

Морфометрический анализ рельефа Белгородской области проводили по двум ЦМР, исходными данными для которых служили топографические карты масштабов 1:25000 и 1:200000 с сечением горизонталей 5 и 20 м соответственно.

В качестве программного продукта использовали многофункциональное ГИС-приложение ArcGIS 10.2, в том числе наборы инструментов SpatialAnalyst и Spatial Statistics.

Топокарты были пространственно совмещены и приведены к единой системе координат (datum WGS-84, UTM 37N). Методом ручной интерактивной векторизации оцифрована плановая высотная основа и основные каркасные линии рельефа: горизонтали, высотные отметки, уровни урезов воды, реки, водоемы, тальвеги крупных балок и оврагов.

Для построения ЦМР использовали метод интерполяции значений высотных отметок и изолиний рельефа TопоToRaster [Hutchinson, 1989], который позволяет получить гидрологически корректную модель рельефа, так как учитывает не только пространственное положение изолиний и высотных отметок, но и расположение водотоков, закрытых водоемов и локальных понижений.



При построении ЦМР по оцифрованной картографической основе минимальный размер ячейки должен равняться толщине линии горизонтали (0.2 мм) в масштабе карты [Яковченко и др., 2002]. Так, для М 1:25000 минимальный размер ячейки будет 5 м, М 1:200000 – 40 м. Для корректной работы и скорости вычислительных операций стоит избегать избыточности данных ЦМР, и целесообразно перейти от минимального размера ячейки к оптимальному, при котором обеспечивается достаточная точность ЦМР для морфометрических и гидрологических вычислений.

При гидрологическом моделировании расчет максимального размера ячейки должен обеспечивать заданную погрешность вычисления параметров водосбора [Яковченко и др., 2002]. Согласно исследованиям [Постнова, 2007], «достаточной величиной при рассмотрении структурных элементов рельефа является уменьшенная в 3–5 раз величина неоднородности рельефа (ложбина, бугор), выраженная в исходных горизонталях в плане». В работе [Gyasy-Agyei et al., 1995] указано, что размер ячейки ЦМР может быть рассчитан как отношение среднего уклона между ячейками грида и его вертикальным разрешением, и полученное значение должно быть больше 1.

При построении ЦМР по векторным данным горизонталей, снятых с топографической карты, целесообразно проводить предварительный анализ сложности рельефа. Б.А. Новаковский с соавторами [2003] рекомендуют в качестве размера ячейки использовать величину средних расстояний между горизонталями. В работе, посвященной подробному анализу принципов выбора размера ячейки [Hengl, 2006], сделан следующий вывод: чтобы отразить большую часть изменений в рельефе, разрешение сетки должно быть равно как минимум половине среднего расстояния между горизонталями (D). Минимальный размер ячейки предлагается рассчитывать по гистограмме вариации расстояния между горизонталями с 5%-ной вероятностью. При построении ЦМР по дискретным данным высотных отметок для выбора размера ячейки предлагается использовать параметр, зависящий от плотности точек.

Оценку точности разномасштабных ЦМР и подбор оптимального шага сетки проводили на тестовом участке в центральной части Белгородской области площадью 3.1 тыс. км² с характерным сильно расчлененным эрозионно-денудационным рельефом. Для каждого масштаба были построены наборы ЦМР с разрешением:

– для М 1:25000: 10, 20, 30, 40 м;

– для М 1:200000: 100, 200, 300, 400 м.

Для каждой ЦМР была оценена точность интерполяции относительно значений высот, снятых с карты. При построении ЦМР неизбежны случаи, когда ячейка «перекрывает» границу резкого перепада высот (бровки оврагов, балок, границы надпойменных террас) и принимает усредненное значение, что негативно сказывается на оценке точности ЦМР. Поэтому такие «выбросы» были исключены путем установления порога ошибки, равного одной высоте сечения горизонталей. Оценку точности ЦМР проводили по 5272 точкам для М 1:25000 и 2736 точкам для М 1:200000.

Самый простой способ оценки точности ЦМР – размер средней абсолютной ошибки $\Delta H_{абс}$, равной модулю разницы интерполированных и исходных высот:

$$\Delta H_{абс} = \frac{|h_i - h|}{n} \quad (1)$$

где h_i – интерполированное значение высоты, м; h – значение исходной высотной отметки, м; n – число точек.

Технологически минимизировать $\Delta H_{абс}$ практически невозможно, поскольку ЦМР, свободная от этой ошибки, должна иметь бесконечно малый размер ячейки [Tang et al., 2001]. В национальном стандарте о точности позиционирования пространственных данных США [Geospatial ..., 1998] для оценки точности местоположения рекомендовано использовать среднеквадратичную ошибку (root-mean-square error, *RMSE*):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} (h_i - h)^2} \quad (2)$$

Для определения величины среднего расстояния между горизонталями использовали инструмент пространственной статистики NearestNeighbor.

Результаты и их обсуждение

На первом этапе была выполнена оценка точности построенных ЦМР разного разрешения и установлен оптимальный размер ячейки, соответствующий масштабам карт 1:25000 и 1:200000 (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Результаты оценки точности высот разномасштабных цифровых моделей рельефа

The results of evaluating the accuracy of the heights of different scales digital elevation models

Масштаб	1:25000				1:200000			
Размер ячейки раstra (a), м	10	20	30	40	100	200	300	400
$\Delta H_{\text{абс}}$	0.10	0.18	0.30	0.38	5.31	5.51	5.94	6.81
$RMSE$	0.30	0.43	0.63	0.74	6.80	6.90	7.21	8.19
Сечение горизонталей, м	5				20			
Среднее расстояние между горизонталями (D), м	80				1181			
Минимальный размер ячейки	5				40			
Максимальный размер ячейки ($1/2 D$), м	40				590			

Для обоих масштабов наблюдается ожидаемый рост $\Delta H_{\text{абс}}$ и $RMSE$ с увеличением шага сетки ЦМР.

Согласно Инструкции по топографическим съемкам [Куприн, 1978], средняя погрешность съемки рельефа не должна превышать $1/3$ высоты их сечения, т. е. при сечении горизонталей 5 м ошибка не должна превышать 1.7 м, при сечении 20 м – не более 6.7 м. Как видно из рисунка 1 (А), для М 1:25000 ЦМР всех вариантов размера ячеек удовлетворяют требованию нормативной погрешности с 95% обеспеченностью.

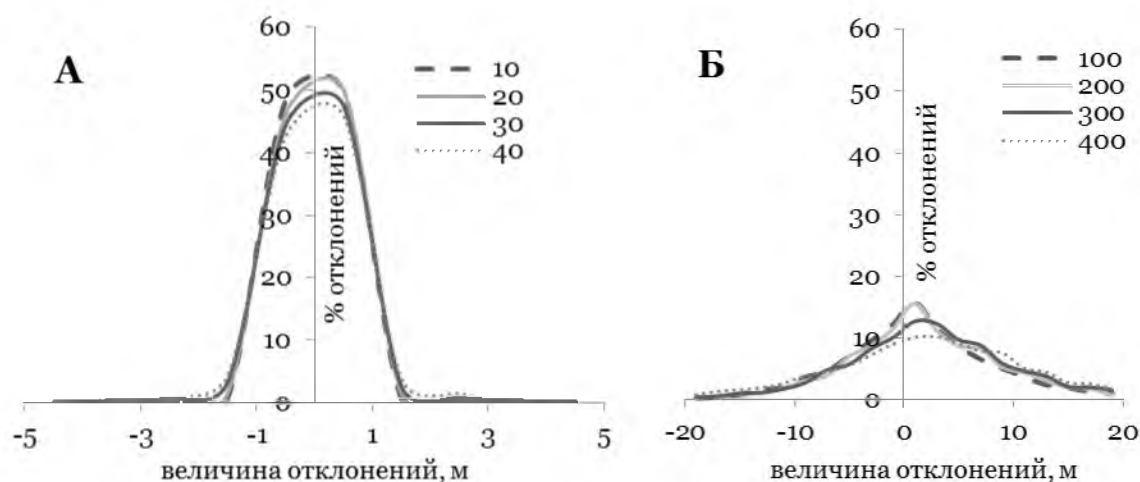


Рис. 1. Отклонение интерполированных значений цифровой модели рельефа от исходных высот: А – для М 1:25000; Б – для М 1:200000

Fig. 1. Deviation of interpolated values digital elevation model from the original height: А – 1:25000; Б – 1:200000

Можно заключить, что для ЦМР М 1:25000 допустимо выбрать разрешение в диапазоне от 5 до 40. Однако визуальный анализ ЦМР с применением эффекта «отмывки» (рис. 2) показал, что при ячейке 5–20 м в модели присутствуют «артефакты» – ошибки, в виде террас вдоль горизонталей. При шаге сетки 30 м артефакты исчезают, что делает его оптимальным для построения ЦМР в масштабе 1:25000 при сечении исходных горизонталей 5 м.

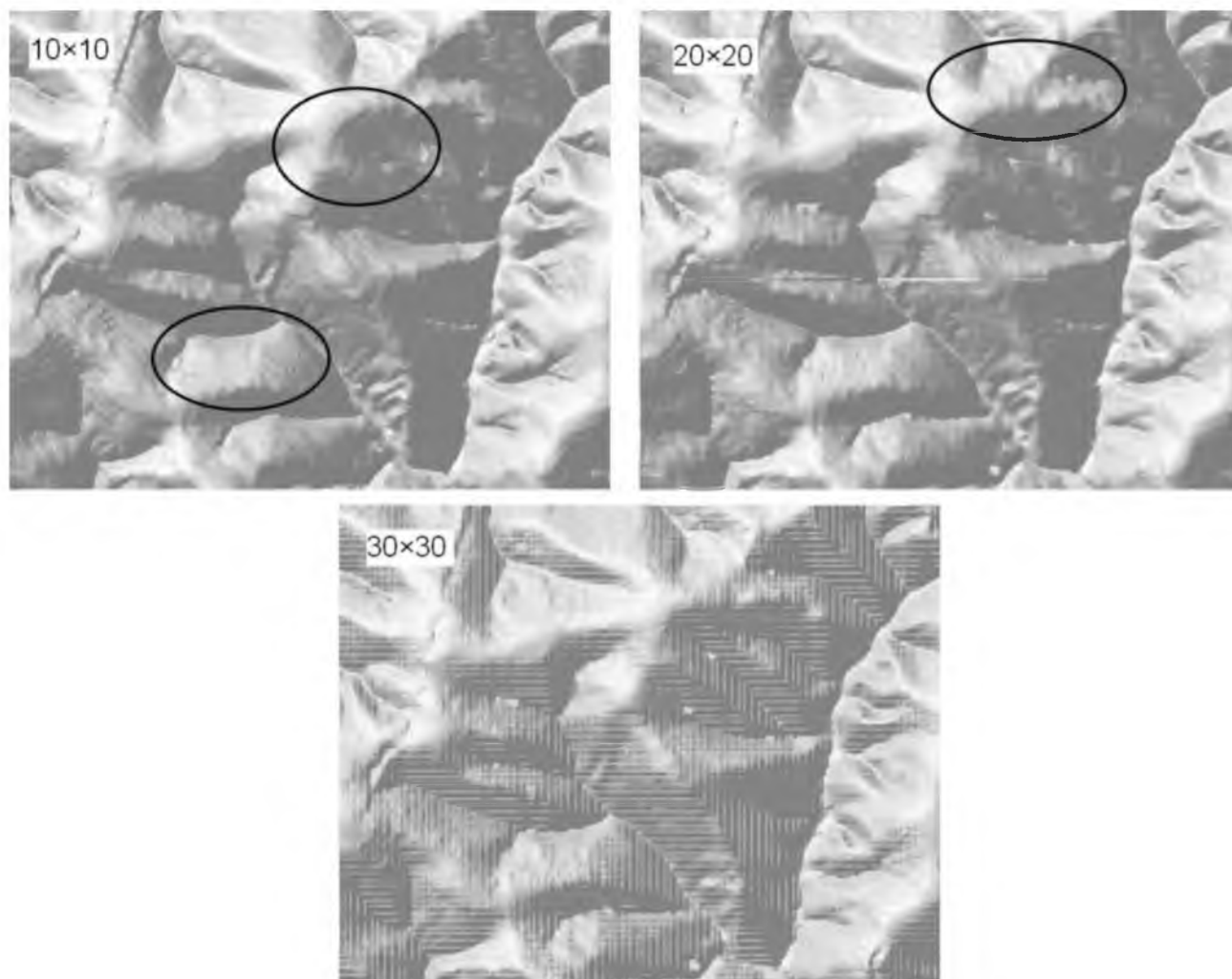


Рис. 2. Выраженность «артефактов» на цифровой модели рельефа в зависимости от размера ячейки (М 1:25000)

Fig. 2. The expression “artifacts” on digital elevation model, depending on the size of the cell (1:25000)

Точность ЦМР, построенной по карте масштаба 1:200000, значительно снижается по сравнению с 1:25000 (см. рис. 1 Б). Наименьшие значения отклонений показали ЦМР разрешением 100 и 200 м, при которых соответственно 69 и 67% значений высотных отметок удовлетворяют нормативной погрешности. Величины RMSE для этих разрешений близки, поэтому при выборе оптимального размера ячейки склоняемся к большему, поскольку построение такой ЦМР потребует меньших ресурсов. При данном масштабе степень генерализации модели не позволяет образоваться артефактам, поэтому визуальный анализ не применялся.

После обоснования оптимальных размеров ячеек для территории Белгородской области были построены две ЦМР: масштаба 1:25000 (разрешение 30 м) и 1:200000 (разрешение 200 м).

Анализ тренда пространственного распределения высотных отметок показывает общую тенденцию изменения направления стока с севера на юг и от



центра на восток. Полученные ЦМР позволили впервые сравнить морфометрические показатели рельефа Белгородской области в разных масштабах (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Распределение некоторых морфометрических показателей территории Белгородской области (в % от общей площади) при разных масштабах
Distribution of some morphometric parameters of the Belgorod region (% of total area) at different scales

Показатель	Масштаб	
	1:25000	1:200000
Крутизна склона, град		
0–1	23.0	32.9
1–3	41.0	49.6
3–5	18.8	16.0
5–10	14.7	1.5
>10	2.5	–
Экспозиция		
северная	11.0	9.3
северо-восточная	10.6	7.8
восточная	7.9	8.6
юго-восточная	8.7	7.8
южная	10.3	8.7
юго-западная	10.9	8.0
западная	8.3	9.0
северо-западная	9.3	7.9
плоские участки (0–1°), в т. ч. под водой	23.0	32.9
Вертикальное расчленение, м		
0–20	1.6	2.5
20–40	10.5	18.6
40–60	30.2	45.0
60–80	37.7	29.7
>80	20.0	4.2

Особенно сильно изменение масштаба ЦМР сказывается на показателе крутизны склонов: разница площадей в одном диапазоне может достигать 13%. При разрешении 200 м некорректно отображаются склоны оврагов и балок, что отражено в незначительной площади склонов 5–10°. Однако в обоих масштабах сохраняется тенденция количественной градации площадей: преобладают пологие склоны крутизной 1–3°. В целом склоновый тип рельефа (>1°) в зависимости от масштаба представлен на 67.1–77.1% территории Белгородской области. Западная часть области более выположена, на востоке наблюдается тенденция к увеличению крутизны, что создает геоморфологические предпосылки для развития водной эрозии и заиления рек.

В распределении экспозиций разница в площадях, обусловленная масштабом исследования, менее выражена. Склоны различной ориентации на территории области распространены практически в одинаковой степени.

Вертикальное расчленение представляет собой значение амплитуды высот в пределах какого-либо участка. Для анализа была построена сетка квадратов со стороной 2 км для М 1:25000 и 4 км для М 1:200000. Размер сетки обоснован наименьшей частотой распределения превышений (при нормальном их распределении) и наименьшей среднеквадратической ошибкой. В целом с запада на восток значение величины вертикального расчленения склонов растет (рис. 3), достигая максимума в бассейне р. Оскол (преобладают разницы высот 70–90 м). Минимальные значения отмечены на западе области в пойме р. Ворскла.

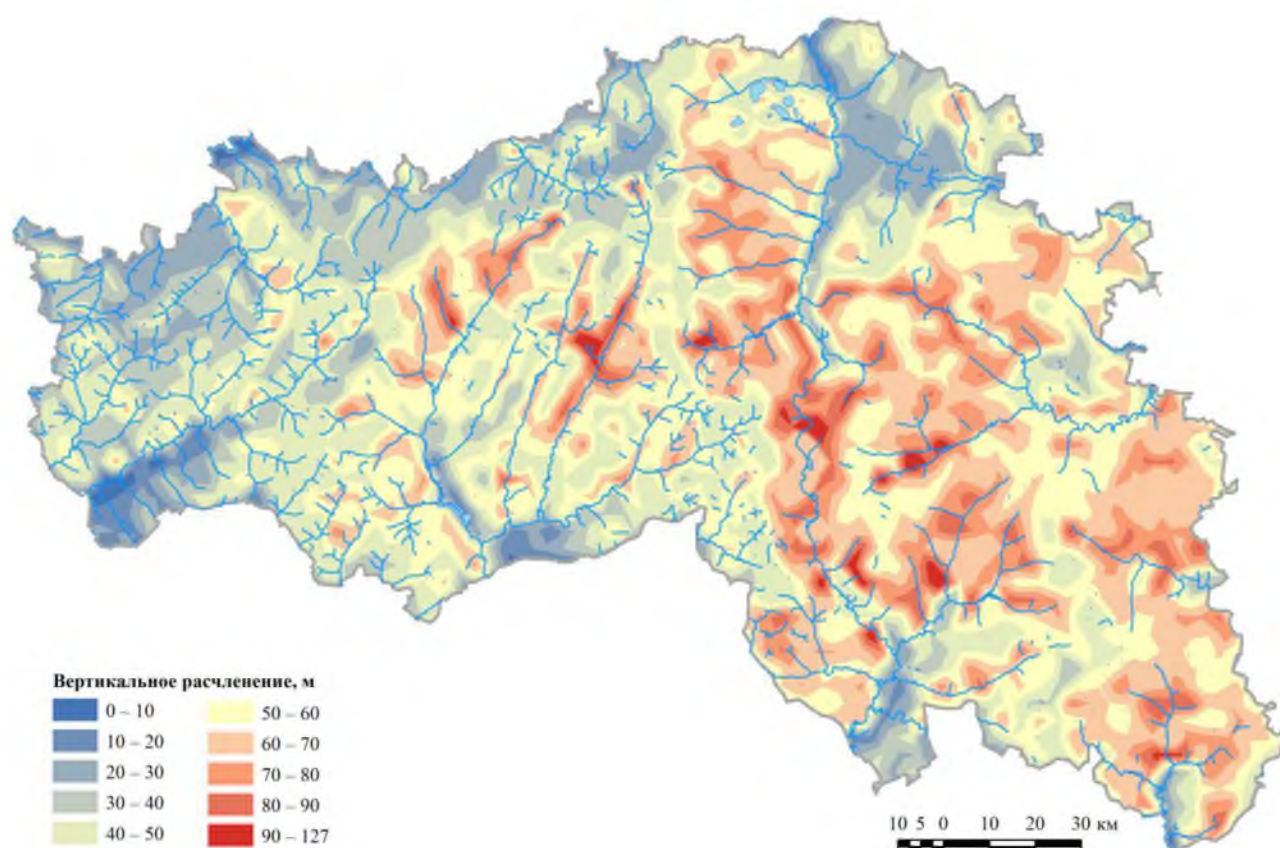


Рис. 3. Вертикальное расчленение Белгородской области (построено по карте М 1:200000)

Fig. 3. The vertical division of the Belgorod region (built on the map 1:200000)

Заключение

В качестве минимального размера ячейки ЦМР может быть использована толщина горизонтали в масштабе карты, максимальной – половина величины среднего расстояния между горизонталями. Для определения оптимального размера ячейки ЦМР предложено оценивать величину средней абсолютной ошибки и среднеквадратической ошибки определения высот с учетом средней нормативной погрешности съемки рельефа. Они должны стремиться к минимуму.

Для территории Белгородской области установлено, что при использовании для построения ЦМР оцифрованных топографических карт М 1:25000 размер ячейки должен составлять 30 м, а М 1:200000 – 200 м.

Впервые проведенное сравнение морфометрических характеристик рельефа, рассчитанных по разномасштабным данным, показывает, что разница в значениях морфометрических показателей может достигать 13%. Самым чувствительным к изменению масштаба параметром является крутизна склона. Морфометрические показатели, определенные по карте М 1:200000, занижены по сравнению с картой М 1:25000, и не отражают специфику овражно-балочного расчленения области. В целом склоновый тип рельефа представлен на 67–77% территории Белгородской области преимущественно северной и южной экспозиций. Преобладают территории с вертикальным расчленением 40–80 м с трендом его увеличения с запада на восток.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №16–35–00226 мол_а.



Список литературы References

1. Белоусова Л.И., Киреева-Гененко И.А., Петина В.И., Шевченко В.Н., Фурманова Т.Н. 2013. Оценка эколого-геоморфологической опасности территории Белгородской области. *Современные проблемы науки и образования*, (5): 547. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=10467>. (22 ноября 2016).
- Belousova L.I., Kireeva-Genenko I.A., Petina V.I., Shevchenko V.N., Furmanova T.N. 2013. Assessment of the ecological-geomorphologic hazard in the Belgorod region. *Modern problems of science and education*, (5): 547. Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=10467>. (accessed 22 November 2016). (in Russian)
2. Гайворонская Н.И. 2012. Оценка пораженности территории Белгородской области опасными экзогенными геологическими процессами и их влияние на хозяйственную деятельность и эколого-геоморфологическую ситуацию региона. *Современные проблемы науки и образования*, (6): 617. URL: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=7610>. (22 ноября 2016).
- Gayvoronskaya N.I. 2012. The estimation of the damage the territory of Belgorod region by the exogenik geological processes and the influence on the mustery activiti end ecologic-geomorphological situation of the region. *Modern problems of science and education*, (5): 547. Available at: <http://science-education.ru/ru/article/view?id=7610>. (accessed 22 November 2016). (in Russian)
3. Глотко А.В. 2005. Построение цифровой модели рельефа на участке Чебоксарского водохранилища между Нижегородским Гидроузлом и Нижним Новгородом. В кн.: *Природообустройство и рациональное природопользование – необходимые условия социально-экономического развития России. Сборник научных трудов. Ч. 1. М., МГУП: 216–221.*
- Glotko A.V. 2005. Building a digital elevation model in the area between the Cheboksary reservoir hydroelectric complex of Nizhny Novgorod and Nizhny Novgorod. In: *Prirodoobustroystvo i ratsional'noe prirodopol'zovanie – neobkhodimye usloviya sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossii. Sbornik nauchnykh trudov. Ch. 1* [Environmental Engineering and environmental management – necessary conditions for socio-economic development of Russia. Collection of scientific papers. Part 1]. Moscow, MSUPA: 216–221. (in Russian)
4. Ерицян Г.Г. 2013. Сравнение цифровых моделей рельефа, полученных с топографических карт масштаба 1:50000, 1:100000 и 1:200000 с ЦМР SRTM. *Известия НАН Армении. Науки о Земле*, 66 (1): 39–47.
- Eritsyen G.G. 2013. Comparison of digital elevation models derived from topographic maps at a scale 1: 50000, 1: 100000 and 1: 200000 with SRTM DEM. *Proceedings of the NAS of Armenia. Earth Sciences Series*, 66 (1): 39–47. (in Russian)
5. Куприн Н.Т. 1978. Инструкция по топографическим съемкам в масштабах 1:10000 и 1:25000. М., Недра, 81.
- Kuprin N.T. 1978. Instruksiya po topograficheskim s"emkam v masshtabakh 1:10000 i 1:25000 [Instructions for topographic surveys at scales of 1:10000 and 1:25000]. Moscow, Nedra, 81. (in Russian)
6. Кузьменко Я.В., Лисецкий Ф.Н., Нарожняя А.Г. 2012. Применение бассейновой концепции природопользования для почвоводоохранного обустройства агроландшафтов. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 14 (1–9): 2432–2435.
- Kuz'menko Ya.V., Lisetskii F.N., Narozhnyaya A.G. 2012. The use of natural resources of the basin concept for pochvovodoohrannogo arrangement of agricultural land. *Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 14 (1–9): 2432–2435. (in Russian)
7. Лисецкий Ф.Н., Дегтярь А.В., Буряк Ж.А., Павлюк Я.В., Нарожняя А.Г., Землякова А.В., Маринина О.А. 2015. Реки и водные объекты Белогорья. Белгород, Константа, 362.
- Lisetskii F.N., Degtyar' A.V., Buryak Zh.A., Pavlyuk Ya.V., Narozhnyaya A.G., Zemlyakova A.V., Marinina O.A. 2015. Reki i vodnye ob"ekty Belogor'ya [Rivers and water bodies of the Belogorye]. Belgorod, Konstanta, 362. (in Russian)
8. Лисецкий Ф.Н., Марциневская Л.В. 2009. Оценка развития линейной эрозии и эродированности почв по результатам аэрофотосъемки. *Землеустройство, кадастр и мониторинг земель*, 10 (58): 39–43.
- Lisetskii F.N., Martsinevskaya L.V. 2009. Assessment of development of linear erosion and soil erosion as a result of aerial photo shooting. *Land management, land monitoring and cadaster*, 10 (58): 39–43. (in Russian)



9. Нарожняя А.Г. 2011. Экологическая и энергетическая оценки агроландшафтов при их адаптивном землеустройстве. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Белгород, 22.
Narozhnyaya A.G. 2011. Ekologicheskaya i energeticheskaya otsenki agrolandshaftov pri ikh adaptivnom zemleustroystve [Environmental and energy evaluation of agricultural landscapes in their adaptive land management]. Abstract. dis. ... cand. geogr. sciences. Belgorod, 22. (in Russian)
10. Нечетова Ю.В., Нарожняя А.Г. 2010. Изучение овражно-балочной сети Белгородской области с применением ГИС-технологий. *Землеустройство, кадастр и мониторинг земель*, 11 (71): 96–100.
Nechetova Y.V., Narozhnyaya A.G. 2010. Study of gullies and ravines network within Belgorod region using GIS technology. *Land management, land monitoring and cadaster*, 11 (71): 96–100. (in Russian)
11. Новаковский Б.А., Прасолов С.В., Прасолова А.И. 2003. Цифровые модели рельефа реальных и абстрактных геополей. М., Научный мир, 104.
Novakovskiy B.A., Prasolov S.V., Prasolova A.I. 2003. Tsifrovyye modeli rel'yefa real'nykh i abstraktnykh geopoly [Digital Elevation Model real and abstract geofields]. Moscow, Nauchnyy mir, 104. (in Russian)
12. Панов Д.В. 2013. Построение цифровой модели рельефа г. Новосибирска и его окрестностей с учетом потоковой структуры и пластики рельефа. *Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий*, (21): 61–65.
Panov D.V. 2013. Construction of a digital elevation model of Novosibirsk and its environs in view of flow structure and relief sculpture. *Vestnik of the Siberian State University of Geosystems and Technologies*, (21): 61–65. (in Russian)
13. Петина В.И., Гайворонская Н.И., Белоусова Л.И. 2009. Эрозионные процессы на территории Белгородской области. *Научные ведомости БелГУ. Естественные науки*, 9/2 (11): 109–117.
Petina V.I., Gayvoronskaya N.I., Belousova L.I. 2009. Erosion processes in the Belgorod region. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural sciences*, 9/2 (11): 109–117. (in Russian)
14. Половинко В.В. 2010. Ландшафтно-экологические основы оптимизации землепользования на разных иерархических территориальных уровнях организации его организации. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Белгород, 23.
Polovinko V.V. 2010. Landshaftno-ekologicheskie osnovy optimizatsii zemlepol'zovaniya na raznykh ierarkhicheskikh territorial'nykh urovnyakh organizatsii ego organizatsii [Landscape-ecological bases of optimization of land use at different hierarchical levels of territorial organization of its organization]. Abstract. dis. ... cand. geogr. sciences. Belgorod, 23. (in Russian)
15. Постнова И.С. 2007. Разработка ГИС-моделей рельефа для гидрологических расчетов. Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Барнаул, 22.
Postnova I.S. 2007. Razrabotka GIS-modeley rel'efa dlya gidrologicheskikh raschetov [Development of a GIS-terrain models to hydrological calculations]. Abstract. dis. ... cand. tech. sciences. Barnaul, 22. (in Russian)
16. Спесивый О.В., Лисецкий Ф.Н. 2014. Оценка интенсивности и нормирование эрозионных потерь почвы в центрально-черноземном районе на основе бассейнового подхода. *Научные ведомости БелГУ. Естественные науки*, 27 (10): 125–132.
Spesivyy O.V., Lisetskii F.N. 2014. Estimate of the intensity and regulation of erosion soil losses in Central Chernozem region based on the basin approach. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural sciences*, 27 (10): 125–132. (in Russian)
17. Тарасова Ю.В. 2014. Исследование закономерностей распределения эрозии почв на меловых породах с применением ГИС-технологий. *Современные проблемы науки и образования*, (3): 784. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13397>. (16 ноября 2016).
Tarasova Yu.V. 2014. Investigation of the distribution of soil erosion in the chalky rocks using GIS technology. *Modern problems of science and education*, (3): 784. Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13397>. (accessed 22 November 2016). (in Russian)
18. Хрисанов В.А., Колмыков С.Н., Манышев В.В. 2016. Развитие и распространение карстовых процессов и их районирование и инженерно-геоморфологическая оценка на территории Белгородской области. *Научные ведомости БелГУ. Естественные науки*, 34 (4): 130–137.
Khrisanov V.A., Kolmykov S.N., Manyshchev V.V. 2016. The development and distribution of karst processes and zoning, engineering and geomorphological assessment of the Belgorod region. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural sciences*, 34 (4): 130–137. (in Russian)



19. Юдина Ю.В. 2005. Типы местностей Белгородской области: опыт ландшафтной дифференциации плакоров. Проблемы региональной экологии, (6): 92–102.
- Yudina Yu.V. 2005. The types of areas of the Belgorod area: the experience of landscape differentiation of the watershed. *Regional environmental issues*, (6): 92–102. (in Russian)
20. Яковченко С.Г., Постнова И.С., Жоров В.А. 2002. Расчет морфологических параметров водосборов средствами ГИС для целей моделирования стока. В кн.: ГИС для устойчивого развития территорий. Материалы Международной конференции (г. Санкт-Петербург, 28 мая – 1 июня 2002 г.). Санкт-Петербург: 295–300.
- Yakovchenko S.G., Postnova I.S., Zhorov V.A. 2002. Calculation of morphological parameters watershed GIS tools for flow modeling purposes. In: GIS dlya ustoychivogo razvitiya territoriy. Materialy Mezhdunarodnoy konferentsii (g. Sankt-Peterburg, 28 maja – 1 ijunja 2002 g.) [GIS for sustainable development of territories. Proceedings of the International Conference (St. Petersburg, 28 May – 1 June 2002)]. Saint-Petersburg: 295–300. (in Russian)
21. Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA) test methodology. FGDC, 1998. Available at: <https://www.fgdc.gov/standards/projects/accuracy/part3/> (accessed 22 November 2016).
22. Gyasy-Agyei Y., Wilgoose G.R., De Troch F.P. 1995. Effects of vertical resolution and map scale of digital elevation models on geomorphological parameters used in hydrology. *Hydrological Processes*, 9: 363–382.
23. Hengl T. 2006. Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences*, 32 (9): 1283–1298.
24. Hutchinson M.F. 1996. A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models. In: Proceedings of the Third International conference integrating GIS and Environmental Modeling (Santa Fe, New Mexico, 21–25 January 1996). Santa Barbara, CA, University of California, National Center for Geographic Information and Analysis.
25. Hutchinson M.F. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106: 211–232.
26. Guo-an T., Strobl J., Jian-ya G., Mu-dan Zh., Zhen-jiang Ch. 2001. Evaluation on the accuracy of digital elevation models. *Journal of Geographical Sciences*, 11 (2): 209–216.
27. Walker J.P., Willgoose G.R. 1999. On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology. *Water Resources Research*, 35 (7): 2259–2268.
28. Yermolaev O.P., Marinina O.A., Lisetskii F.N., Buryak Z.A. 2015. Basin and eco-regional approach to optimize the use of water and land resources. *Biosciences Biotechnology Research Asia*, 12: 145–158.